

시물레이션과 소성가공

오 수익

서울대학교 기계설계학과

Simulation and Metal Forming Processes

Soo-Ik Oh

Department of Mechanical Design and

Production Engineering

Seoul National University

Seoul, 151-742, Korea

1. 서론

일반적으로 성공적인 금속성형 공정은 풍부한 경험과 비용이 많이 드는 시행 착오에 의하여 결정된다. 이러한 전통적인 성형 공정 설계 방법은 더욱 효과적인 컴퓨터 시물레이션에 의한 설계 방식으로 급속도로 전환되어 가는 것이 세계적 추세이다. 현재 세계적으로 우수한 회사에서는 시험 가공 이전에 컴퓨터를 이용한 모델링(Modeling)을 사용하여 신속히 공정을 평가하고 최적화한다. 또한 시물레이션의 효과적인 응용을 위한 많은 연구가 누적되어왔고 또한 현재에도 이를 더욱 향상시키기 위한 연구가 진행중이다.^[1~11]

본 강연은 현재 시물레이션이 성형 공정 설계에 응용되는 것을 실례를 들어 고찰하고 시물레이션의 현황 및 그 문제점과 앞으로 필요한 연구 과제 등에 대하여 생각해 보고자 한다.

2. 시물레이션 시스템 개요

2.1 유한요소 해석 모듈

유한요소법을 이용하여 성형 공정을 해석하기 위한 프로그램은 소성 유동을 예측하는 소성 가공 프로그램과 성형중 온도 변화를 예측하는 열전달 프로그램으로 이루어지며, 따라서 등온 가공, 비등온 가공 및 열전달을 시물레이션 할 수 있어야 한다. 특히 급속소성가공을 위하여는 다음과 같은 재질을 가진 물체의 변형을 해석할 수 있어야 한다.

- 소성 변형 해석을 위한 강소성 및 강점소성 물체,
- 금형 응력 해석을 위한 선형 열탄성 물체,
- 분말 성형 해석을 위한 다공질 물체.

다양한 특성의 물체간 접촉을 해석하기 위한 접촉면 모델은 소성체와 강성체의 접촉, 소성

체와 탄성체 접촉, 탄성체와 탄성체, 소성체와 소성체 등의 접촉을 다룰 수 있어야 하며 이 외에 필요한 중요한 특성으로는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

- 금형은 강체 또는 탄성체로 취급할 수 있다.
- 강체 금형의 형상은 모서리 점의 좌표와 반경으로 표시하거나 직선과 원호로 표시할 수 있다.
- 금형의 구동은 시간에 따라 변하는 금형의 속도, 금형의 하중 및 금형의 에너지 등으로 조절된다.
- 피가공체의 유동응력은 변형률, 변형률 속도 및 온도의 함수로 나타낸다.
- 마찰 응력은 쿨롱 마찰과 전단 응력 인수(Constant shear factor) 마찰 법칙으로 주어진다.
- 접촉면에서의 열전달 계수는 시간 또는 접촉 응력의 함수로 나타낸다.

이를 이용하여 시뮬레이션 할 수 있는 공정의 범위는 다음과 같다.

- 금속의 냉간, 온간 및 열간 성형 공정,
- 고체 상태에서의 유리 및 폴리머의 성형,
- 분말 단조,
- 분말의 hip(hot isostatic pressing)과 cip(cold isostatic pressing),
- 압연 공정,
- 열전달, 등.

2.2 전후 - 처리

경험에 의하면 시뮬레이션 프로그램이 생산 현장에서 쓰여질 수 있는 현실적인 도구가 되기 위해서는 유한요소 해석 모듈만으로는 부족하다. 유한요소법을 이용한 시뮬레이션에서는 비교적 많은 양의 정보를 취급하기 때문에 효율적인 입력 장치와 출력 장치가 필수 불가결한 것이다. 현재 시중에는 범용으로 쓸 수 있는 유한요소법을 위한 전후 처리 소프트웨어를 구할 수 있으나 이들은 주로 구조 해석용으로서 소성가공에서 필요한 사항들을 제대로 충족시키지 못하고 있는 형편이다. 이러한 점을 개선하기 위하여, 사용자의 경험과 피드백에 기초하여 금속가공 전용 전후 처리 모듈을 개발하여 생산 현장에서 사용하는데 불편이 없도록 배려하는 것이 필요하다.

유한요소 프로그램을 사용하기 위하여 필요한 입력은, 요소망을 제외하고, 다음과 같다.

- 피가공체 및 금형의 물성(유동 응력, 탄성 계수, 열팽창 계수, 열전도 계수 등),
- 접촉면의 성질(마찰 계수, 접촉면 열전달 계수 등),
- 경계 조건 및 금형의 구동 형태,
- 초기 조건(초기 온도, 초기 성질 등).

소성가공 전용 후처리 장치는 다음과 같은 기초 기능을 가져야 한다. 즉

- 사용자가 직접 관찰할 수 있는 해석 결과의 출력 (Alphanumeric output),
- CAD/CAM과 연결하기 위한 해석 결과의 출력 (Alphanumeric output),
- 해석 결과의 화상 출력.

화상 출력은 다음과 같은 표준화된 기능을 가지고 있어야 한다.

- 유한 요소망 그림,
- 변형률, 변형률 속도, 응력 및 온도 분포의 등고선 그림,
- 속도 분포도,

- 하중-변위 곡선, 등.

금속의 소성 변형 시뮬레이션에서 가장 중요한 정보 중의 하나는 재질의 유동상태이다. 그러나 요소망이 재구성되었을 때, 요소망은 유동에 관한 정보를 제공하지 못한다. 요소망이 재구성되었을 때에도 금속의 유동을 알아볼 수 있기 위하여 Flow-net 기법이 필요하다. Flow-net 기법에서는 유한 요소망과 무관한 초기 격자가 피가공체의 소성 변형에 따라 변형되는 모양을 그림으로 나타낸다. Flow-net 기법은 물체의 이동을 알아보는데 편리할 뿐만 아니라, 텍스처(결)의 발생 형태와 첨가 섬유 방향을 예측하는데 유용하다. 또한 체적의 국소적 유동이 중요한 예비가공형 설계에서도 유용하게 사용된다.

2.3 자동 요소망 생성과 재구성

유한요소를 이용한 시뮬레이션에서는 요소망 생성 작업이 필수적인 것으로 그 작업은 아직도 많은 시간이 소요되는 일이다. 종래의 요소망 생성 방법은 사용자가 요소망의 밀도 분포를 결정하여야 하며, 요소망의 밀도 분포는 최소의 컴퓨터 시간 사용으로 최상의 해를 얻도록 하여야 한다. 따라서, 요소망의 질은 사용자의 경험에 의하여 결정되었고, 실제로 요소망의 생성에 많은 시간이 소모된다.

이를 위하여는 두개의 모듈을 개발하는 것이 필요한데, 하나는 요소망의 최적 밀도를 결정하는 것이고, 다른 하나는 주어진 밀도에 의해 요소망을 구성하는 프로그램이다. 최적의 밀도는 다음과 같은 점을 고려하여 결정된다.

- 물체의 기하학적인 모양,
- 변형률 속도의 분포,
- 온도의 분포,
- 변형률 분포.

소성가공은 매우 큰 소성 변형을 동반하므로 유한요소를 이용한 시뮬레이션 중에는 요소망의 재구성이 필요하다. 종래에는 사용자가 요소망 재구성의 필요성을 결정함과 동시에, 요소망의 재구성을 직접 수행하여 시뮬레이션을 계속하였다. 이러한 과정들은 실제적인 소성가공 공정의 시뮬레이션 수행에 이용되기에는 매우 불편하고 시간이 걸리는 작업이다.

유한요소 시뮬레이션 프로그램과 자동 요소망 생성 프로그램의 결합으로 다음과 같은 작업을 사용자의 입회 없이 자동으로 수행할 수 있다.

- 요소망 재구성의 필요성 결정,
- 피가공체의 기하학적 형상과 이제까지의 해석 결과에 기초한 최적 요소망 밀도의 결정,
- 정해진 최적 요소망 밀도를 바탕으로한 요소망의 재구성,
- 경계조건 및 변형률 분포 등의 정보를 구 요소망으로부터 새 요소망으로의 전환,
- 시뮬레이션이 끝날 때까지 위 과정을 계속.

이차원 시뮬레이션의 경우 요소망 생성과 종래에는 시간이 많이 걸리던 요소망 재구성 작업을 자동화함으로써 시뮬레이션을 보다 신속 정확히 수행할 수 있게 되었다. 또한 요소망의 최적 밀도 분포를 자동적으로 결정함으로써, 경험에 의한 것보다 더 좋은 요소망 생성이 가능하게 되었다. 반면에 삼차원 시뮬레이션에서는 요소 생성과 재구성의 자동화가 별로 이루어지지 못하고 있으며 이는 삼차원 시뮬레이션의 보편화에 큰 장애물이 되고 있다.

3. 응용 예

시뮬레이션은 여러 가지의 성형 공정에 성공적으로 적용되어 왔다. 그 응용의 예를 들면

- 예비가공형 설계를 위한 재료유동과 금형 충전,
- 금속 미세조직의 예측,
- 금형 마모의 연구,
- 금형 파괴 예측,
- 재료유동에 기인한 결함의 발생 예측,
- 피가공재의 변형에 의한 파괴 예측.

이 장에서는 몇 개의 이차원과 삼차원 응용 예를 소개함으로써 유한요소법의 효용성을 주장하고자 한다.

3.1 코이닝 (coining) 결함^[8]

코이닝 공정에서는 제품 치수의 정확도와 표면 조도가 매우 중요하다. 코이닝 공정은 일반적으로 성형 하중이 높은 관계로 금형의 탄성 변형에 의하여 제품의 치수에 상당한 영향을 받는다. 또한 금속의 유동형태에 따라 보기 흉한 표면이 발생하는 경우도 많다.

코이닝 공정 중에 일어나는 변형 특성을 연구하기 위하여, 간단한 코이닝 공정을 유한요소법을 이용하여 예측하였다. 코이닝 블랭크는 두께가 0.0685 in. 이고 지름이 1.185 in. 인 원판형이다. 코이닝 블랭크는 세 개의 접촉된 층으로 되어 있다. 가운데층은 구리이고 아래와 위의 층은 니켈과 구리의 합금으로 되어 있다. 위 금형 (obverse die) 과 아래 금형 (reverse die)은 변형면에 수직인 크기가 다른 구루부로 되어 있다.

본 시뮬레이션에서는 코이닝 블랭크는 소성체로 가정하였고, 위 아래 금형은 탄성체로, 그리고 코인의 금형 밖으로의 유동을 막는 collar ring 은 강성체로 가정하였다. 금형의 재질은 저탄소강으로 가정하였고 변형은 평면 변형으로 가정하였다. 그림 1은 변형이 없는 블랭크 상태에서부터 시작하여 변형이 진행되는 과정을 유한요소법을 이용하여 예측한 것이다. 그림에서 보면 위쪽 금형이 먼저 채워지는 것을 알 수 있다. 아래쪽 금형의 충전은 위쪽 금형이 거의 채워진 후에야 시작된다. 아래쪽 금형의 충전이 시작 될 때 코인의 위 쪽 표면이 금형 표면과 분리되면서 “suck-in” 결함이 발생한다. Suck in 결함은 코이닝 압력이 증가하면서 점차 없어지지만 suck-in 결함으로 인하여 성형된 코인의 표면이 거친 채로 남게 된다.

시뮬레이션의 결과에서 알 수 있듯이 코인의 두께에 비해 상대적으로 상당히 큰 금형의 변형이 일어난다. 그림 1에서 보면 코인의 두께는 응력을 받지 않은 금형 공간과 상당한 차이를 보이는데 이는 금형의 탄성 변형에 기인한다. 그림 2는 위에서 기술한 코이닝 작업을 직접 실험하여 얻은 단면을 나타낸다. 실험 결과를 보면 시뮬레이션이 실험 결과와 아주 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

3.2 알루미늄 밸브 부품의 냉간 단조^[9]

밸브 부품의 냉간 단조 공정을 해석하였다. 단조품의 기하학적 형상이 그림 3에 주어져 있다. 그림에서 보는 바와 같이 실제 공정은 원형 단면 빌렛에서 시작하여 사각형 단면을 압출하는 삼차원 공정이지만, 계산은 평면 변형으로 가정하고 한 단면에서 수행하였다.

부품의 재질은 Al 6062 이며 그 유동 응력은 $\bar{\sigma} = 204.6 \bar{\epsilon}^{0.122}$ MPa로 나타낼 수 있다고 가정한다. 마찰 상수는 0.1을 사용하였고, 금형과 펀치는 강성체로 가정하였다. 시뮬레이션 중에는 자동 요소망 재구성 프로그램을 사용하여 사용자의 입회 없이 시뮬레이션을 완성하였다. 요소망 재구성 시점은 금형과 피가공체의 간섭 깊이를 제한하는 것과 부적합한 요소의 생성을 방지하는 것 등으로 결정되었으며, 요소 밀도는 변형률, 변형률 속도 및 피가공체의 외각선 곡률 등에 의하여 결정되었다. 본 시뮬레이션에서는 최초의 요소망을 포함하여 모두 8 번의 요소망 재구성이 필요하였다.

본 시뮬레이션의 목적은 실험에서 관찰된 결함과 텍스처 (결)를 예측하는 것이다. 그림 4에 예측된 텍스처를 보여준다. 예측된 텍스처는 초기 상태에서 세로로된 평행선을 Flow-net 기법에 의하여 만든 것이다. 예측된 텍스처는 실험에서 얻은 것과 매우 잘 일치하는 것이 관측되었다.

또한 압출 과정 중에 파이프 (piping) 결함이 발생한다. Flow-net 그림에서는 결함이 대칭선 위에 있으므로 결함의 예측 여부를 잘 알 수 없으나, 질점추적법이라는 후처리 방법을 사용하여 상단의 자유 표면이 대칭선으로 빨려 들어가서 결함이 생기는 것이 그림 5에 나타나 있다. 또한 본 시뮬레이션에 있어서 AMG는 크고 작은 요소망을 적절히 배열함으로써 결함 발생과 같은 복잡한 유동도 성공적으로 예측할 수 있다는 것을 말해 준다.

3.3 링 기어의 열간 단조^[8]

대부분의 단조 공정은 다단 공정으로 수행된다. 따라서, 실제적인 단조 시뮬레이션 도구로 사용할 수 있기 위하여서는 다단 공정을 다룰 수 있는 능력이 필수적이라 하겠다. 이러한 다단 공정 시뮬레이션의 기능을 보이기 위하여 링 기어 단조 공정을 시뮬레이션 하였다. 그림 6은 링 기어 단조에 사용되는 세계의 단계, 즉 바스팅, 블럭킹, 그리고 피니싱 금형을 보여준다.

초기 빌렛은 직경 3 in, 높이 7.96 in 되는 중실 원주이다. 단조된 링 기어의 직경은 약 8 in 이다. 피가공체의 재질은 AISI 4130 이고 금형 재질은 H11 공구강이다. 빌렛은 초기에 노에서 2200°F로 가열된다. 그리고 피가공체를 금형까지 옮기는데 4 초가 소요되며 이 운반 기간 중 방열과 대류에 의하여 열이 손실된다. 옮겨진 후에 피가공체는 하부 금형 위에 놓여지며, 변형이 시작되기까지 1 초 동안 빌렛은 하부 금형과 공기 중으로 열을 잃게 되며, 이 기간을 듀엘링 기간(dwelling period) 이라고 한다. 1 초의 듀엘링 기간이 지나면 변형이 시작된다. 성형 기계는 세계의 전 공정에서 모두 기계식 프레스를 사용한다고 가정한다. 사용된 프레스의 규격은 12 in 의 스트로크와 45 rpm 이다. 변형 공정이 끝나면, 상부 금형은 피가공체로부터 올려지고 피가공체는 다음 공정으로 옮겨가기까지 2 초 동안 하부 금형 위에 놓여 있게 된다. 이 2초 동안의 기간을 레스팅 기간(resting period) 이라고 한다. 시뮬레이션에서는 성형 공정주기 (운반, 듀엘링, 변형, 레스팅 기간)가 바스팅, 블럭킹 및 피니싱 공정에 모두 같이 적용된다고 가정하였다. 시뮬레이션에 쓰이는 피가공체와 하부 금형 사이의 열전달 계수는 듀엘링 기간과 레스팅 기간 중 서로 다른 값을 가진다.

그림 7에는 블럭킹 공정의 시작과 끝에서 예측된 Flow-net 가 주어져 있다. 이 Flow-net은 초기 형상에 입힌 가로 세로 각각 10 칸 씩의 격자로부터 예측된 것이다. 그림 8은 피니싱 공정의 처음과 끝에서의 Flow-net의 모양을 보여준다. 예측된 Flow-net로부터 전 단조 공정에서의 유동을 쉽게 볼 수 있다. 그림 9로부터 시뮬레이션이 금형 충전이 채 안된 곳을 예측하는 것을 알 수 있다. 동시에 재질이 플래시로 유동해 들어간 것을 볼 수 있는

데, 이는 변형 하중을 높이는 요인이 된다. 여기서는 재질의 플래시 유동등과 같은 복잡하고 부분적인 변형에도 자동 요소망 재구성 기법 (AMG)을 성공적으로 사용할 수 있었음을 보여주고 있다.

유한요소법의 후처리에서는 온도, 변형률, 변형률 속도 및 응력 분포 등을 등고선으로 나타내는 것이 일반적인 방법이다. 그러나 때로는 각 질점에서의 온도, 변형률 등이 시간에 따라 변화하는 것을 관찰하는 것이 필요하다. 질점추적법을 사용하면 위치를 포함한 질점의 변형과 온도에 관한 모든 변화를 시간의 함수로 나타낼 수 있다. 그림 9는 선택된 질점들의 위치 변화를 초기 빌렛과 블럭킹과 피니싱이 끝난 상태에서 보여주고 있다. 여기에서 질점 1, 2, 3은 초기 빌렛에서의 위치를 선택하여 변형 후의 위치를 계산한 것이고, 질점 4는 변형이 끝난 후에 선택하여 변형중과 변형 초기에서의 위치를 역으로 계산해낸 것이다. 전자의 방법을 전진 추적이라고 하고, 후자의 경우를 후진 추적이라고 한다. 그림 10은 위에 언급한 네개의 점에서의 온도 변화를 시간의 함수로 나타내었다. 이 그림은 각 성형 공정 중 질점의 온도가 어떻게 변화하는가를 보여주고 있다. 예로서 피가공체의 운반 중 표면의 온도는 방열과 대류의 영향으로 내부 질점의 온도보다 빨리 감소하는 것을 보여준다. 듀엘링 기간 중에는 피가공체의 밑바닥 온도가 화씨로 몇 백도 떨어지는 반면 윗면 온도는 상대적으로 별로 변화가 없다. 변형 중에는 금형 접촉면의 온도는 상당히 떨어지지만 자유 표면과 내부의 온도는 변형열에 의하여 증가한다. 레스팅 기간 중에는 상단 표면 온도는 증가하지만 밑바닥 온도는 계속 떨어지게 된다. 그림 10에서 보여준 것 같은 예측된 온도 변화는 열간 단조 공정을 설계하는데 매우 중요한 정보라고 하겠다.

3.4 Ti-Al 합금의 canned extrusion^[10]

소성가공이 힘든 재료를 압출 할 때 재료의 온도가 떨어지는 것을 방지하기 위하여 다른 금속으로 된 통 (can)에 밀폐한 후 압출 한다. Can 압출을 성공적으로 하기 위하여서는 빌렛과 can 재질의 강도 비례와 이들 재질의 열전달 특성에 관한 고찰이 필요하다. 시뮬레이션에 사용된 can 압출 공정이 그림 11에 그려져 있다. 빌렛은 직경이 30 mm이며 122 mm이고 Can 의 벽 두께는 6.35 mm 이다. 압출 금형의 다이 각도는 90도 이고 압출비는 1:6 이다. Ti-Al의 유동 응력은 $\bar{\epsilon} = 8.50 \bar{\sigma}^{5.436} \exp(-47900/T)$ 로 나타낼 수 있으며, 여기서 변형률 속도 $\dot{\epsilon}$, 유동응력 $\bar{\sigma}$, 및 온도 T 의 단위는 각각 s^{-1} , MPa 와 Kelvin으로 나타낸다. Can 의 재질은 304 스테인레스 강이며 그 유동응력은 문헌[1]에서 얻을 수 있었다. 빌렛과 can 의 초기 온도는 각각 1200 °C과 900 °C이라고 가정하였다. 압출 금형과 편치의 재질은 H11 공구강이고 공구의 초기 온도는 260 °C라고 가정하였다.

Can 과 빌렛 사이는 절연이 비교적 잘되어 있고 접촉 열전달 계수는 5.0 N/(mm² °C)라고 가정하였다. 그 외의 접촉면에서는 열전달 계수가 25.0 N/(mm² °C)라고 가정하였다. 마찰 상수는 m=0.2 이고 편치의 속도는 6.35 mm/s이었다.

그림 12는 시뮬레이션 결과에 의하여 예측된 flow-net을 보여 준다. 시뮬레이션의 결과에 의하면 초기에는 변형이 빌렛 코너 근처의 can 벽에 집중되어 있으며 빌렛은 거의 변형하지 않는다. 그러나 압출이 진행되면 빌렛의 아래 중심 부분이 변형되며 마침내는 정상 상태에 이르게 된다.

한편 can 재료를 성형 온도에서 스테인레스 강보다 약한 Ti 합금을 쓴 경우 can 이 찢어지며 압출은 실패한다는 것이 시뮬레이션에 의하여 예측되었다. 이러한 시뮬레이션의 결과들은

실험에서 관찰된 결과와 잘 일치하고 있으며 이는 복합 재료의 성형 설계에도 시뮬레이션의 유용함을 보여 주고 있다.

3.5 3 차원 시뮬레이션의 예^[11]

근래에는 삼차원 시뮬레이션의 응용이 점차 늘고 있는 추세이다. 그 응용 범위도 간단한 기하학적 형상으로부터 꽤 복잡한 형상의 성형 가공등으로 넓어지고 있으나 이차원 경우와는 달리 아직 여러 가지 제약을 받고 있다. 즉 삼차원 시뮬레이션은 아직 많은 CPU 시간이 소요되며 전 후 처리 소프트웨어의 개발이 미흡한 상태이다. 특히 삼차원 자동 요소 생성 소프트웨어의 미흡한 발달로 인하여 삼차원 시뮬레이션은 아직 현장에서 성형 공정 설계 도구로 쓰여지는데 많은 문제점을 제기하고 있는 실정이다.

삼차원 시뮬레이션의 유용성을 증명하기 위하여 냉간 헤딩 공정을 해석하였다. 냉간 헤딩 공정에서는 그리퍼 금형 위쪽의 지지되지 않은 빌렛의 높이에 따라 공정의 한계가 결정된다. 즉 지지되지 않은 빌렛 길이가 직경의 2 내지 3배가 넘으면 좌굴 현상이 발생하고 재질이 한 쪽으로 몰리게 된다. 빌렛을 전단에 의하여 자르는 경우 빌렛의 끝면은 빌렛 축과 수직하지 않게 된다. 이러한 빌렛 끝면의 기하학적인 결함은 균형 있는 금속의 유동을 억제 하게 된다.

현 시뮬레이션에서는 빌렛 재질이 AISI 1045 로 가정했으며 금형과 피가공재의 사이의 마찰 상수는 $m=0.2$ 로 가정하였다. 빌렛의 직경은 2.54 mm이며, 두 개의 서로 다른 빌렛의 길이는 그리퍼 부분을 포함하여 각각 127 mm와 89 mm 이며, 두 개의 빌렛이 모두 같은 정도의 끝면 결함을 갖는다고 가정하였다.

그림 13은 서로 다른 두 경우의 시뮬레이션 결과를 보여 주고 있다. 시뮬레이션 결과가 보여 주듯이 길이와 직경(L/D)비례가 추천된 범위보다 큰 경우 좌굴이 일어나며, 추천된 범위 내에서는 좌굴 현상이 나타나지 않는 다는 것이 예측되었다.

그림 14는 좀더 복잡한 형상인 커넥팅 로드 의 열간단조 과정을 시뮬레이션 한 것이다. 본 시뮬레이션은 IBM 53H 워크스테이션으로 하루가 채 안걸리는 것이 지만, 시뮬레이션에 사용된 요소의 숫자는 계산 시간을 줄이기 위하여 실제 정확한 예측을 하기 위한 것보다 현저히 적게 사용되었다는 것을 말해둔다.

4. 결론

이상에서 설명한 바와 같이 소성 성형 공정 설계에 있어서 유한요소 시뮬레이션의 유용성은 이미 확립되었으며 일부 첨단 회사에서는 공정 설계시 필수 불가결한 도구로 사용되고 있다. 한국에서도 유한요소 시뮬레이션에 대한 연구가 여러 연구자들에 의하여 활발히 진행되고 있으며 그 질적 수준도 세계 어느 나라에도 뒤지지 않는 수준이다. 한편 소성가공업체에서는 이러한 시뮬레이션 도구가 잘 사용되고 있지 않은 것 같으나 외국과의 경쟁력을 높이기 위하여 반드시 고려되어야 할 점이라고 생각한다.

끝으로 현재 시뮬레이션의 문제점과 앞으로의 발전 방향 등을 몇개 지적하고 결론을 맺으려 한다. 첫째로 현재 많은 유한요소 시뮬레이션에 관한 연구가 진행되고 있으나 시뮬레이션에 사용될 재질의 성질, 즉 유동특성 및 열전달 특성 등에 관한 연구는 그리 많지 않은 것 같으며 이는 시뮬레이션 발전에 많은 지장을 초래하리라 생각된다. 둘째로 아직도 삼차원 시뮬레이션은 많은 CPU 시간과 자동 요소 구성법 발달이 미흡하여 현장에서 이를 설계 도구로 쓰기에는 아직 부적당 한 것 같다. 이에 대한 많은 연구가 진행되어야 하리라 생각된다. 셋

제로 이제까지의 대부분의 연구는 주로 재질의 유동 예측에 관한 것이 성공적으로 수행되었으나 향후는 미세조직의 예측등 유동 예측 이외의 것들도 심도 깊게 다룰 수 있어야 하리라 생각된다. 마지막으로 현재의 시뮬레이션은 금형 형상, 빌렛 형상 등의 성형 조건들이 주어졌을 때 유동등의 현상을 예측하는 정도이어서 성형조건을 최적화하기 위하여는 조건을 변형시켜 가며 많은 시뮬레이션을 수행하여야 하는 불편함이 있다. 이러한 불편을 해결하기 위한 최적화에 관한 연구가 필요하다고 생각된다.

참고 문헌

1. Unpublished measurements of the Research Center for Closed Die Forging (Forschungsstelle Gesenkschmieden), Hannover, Germany.
2. C.H. Lee and S. Kobayashi, "New solutions to rigid-plastic deformation problems using matrix method", Trans. ASME, J. Eng. Ind., 95, 1973, p865
3. Y.T. Im and S. Kobayashi, "Analysis of axisymmetric forging of porous materials by the finite element method", in: S.R. Reid(Ed.), Metal Forming and Impact Mechanics, Pergamon Press, Oxford, p103
4. J.J. Park, N. Rebelo and S. Kobayashi, "Deformation analysis and blank design for square cup drawing", Int. J. Mach. Tool Des. Res.,23, 1983, p71
5. S.M. Hwang and S. Kobayashi, "Preform design in plane-strain rolling by the finite element method", Int. J. Mach. Tool Des. Res.,24, 1984, p253
6. N.S. Kim and S. Kobayashi, "Preform design in H-shaped cross sectional axisymmetric forging by the finite element method", Int. J. Mach. Tools Manuf., 30, 1990, p243
7. 박치용, 양동열, 이경훈, 은일상, "점진단조 및 복합성형법을 이용한 대형 도움단조품의 공정개발", 소성가공학회 춘계학술대회 초록집, 1993, pp33-36
8. S.I. Oh, W.T. Wu, J.P. Tang and A. Vedhanayagam, "Capabilities and applications of FEM code DEFORM: the perspective of the developer", J. Material Processing Technology, 27, 1991 pp25-42
9. W.T. Wu, AMG: "Automated mesh generation for forming simulation", Ph.D. Dissertation, The Ohio State University, 1989
10. S.L. Semiatin, S.I. Oh, R.J. Firentino, V.Seetharaman and J.C. Malas, "Hot working of titanium aluminide-An overview", to be published in Proc. of 1st Int. Conf. on Heat-Resistant Materials, 1991, pp22-25
11. W.T. Wu, G.J. Li, J.P. Tang, "Finite Element Analysis of Three-Dimensional Metal Flow in Cold and Hot Forming Process", Annals of CIRP, Vol. 43, 1994, pp 235-239

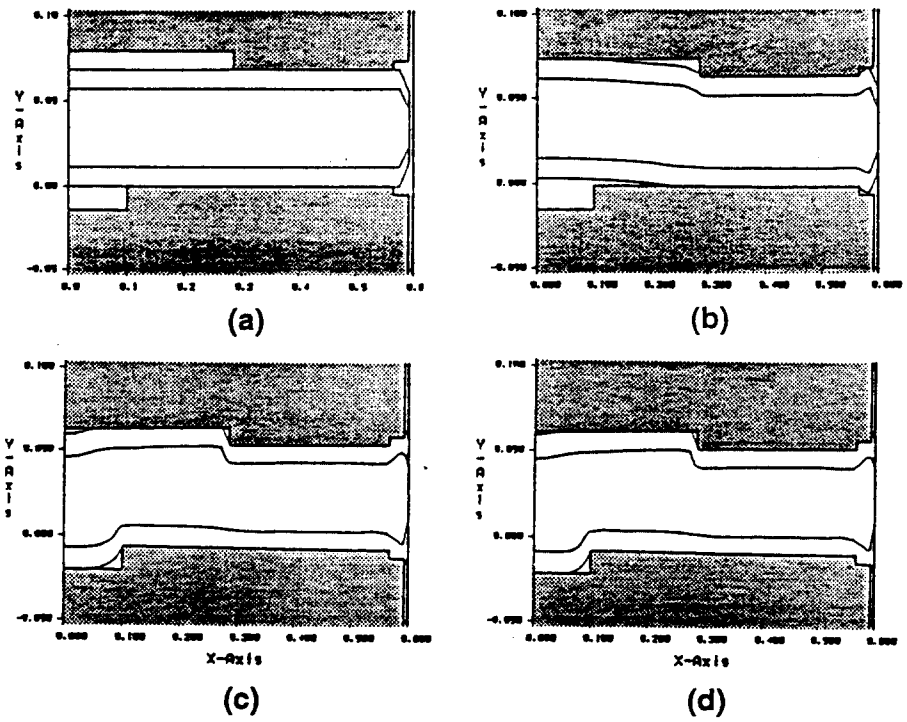


Fig 1. Predicted deformation patterns at different stages of coining operation.
 For illustration purpose, y-axis is enlarged 3 times more than x-axis.

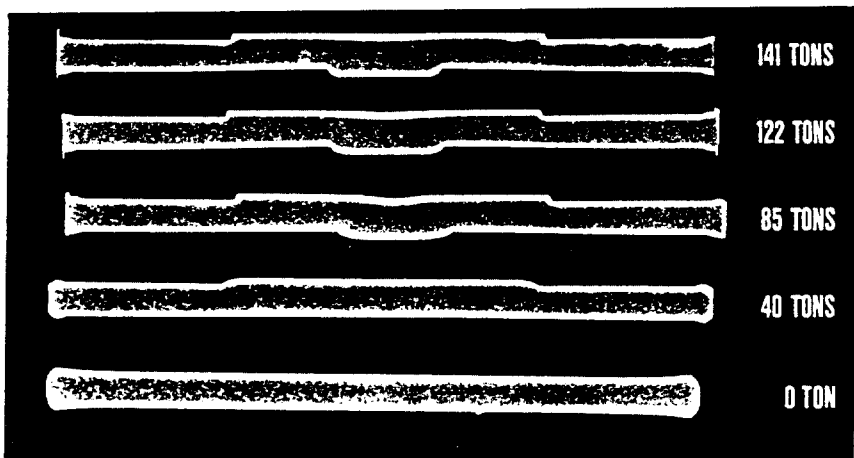


Fig 2. Actual deformation patterns at different stages of coining operation.

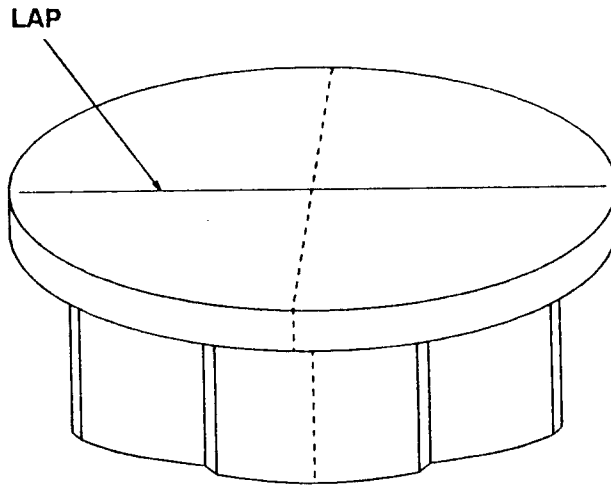
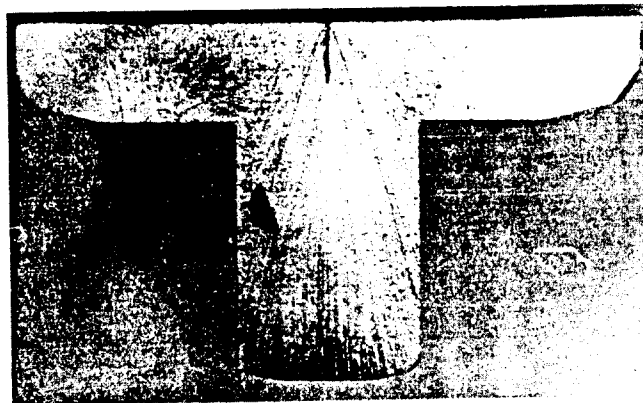
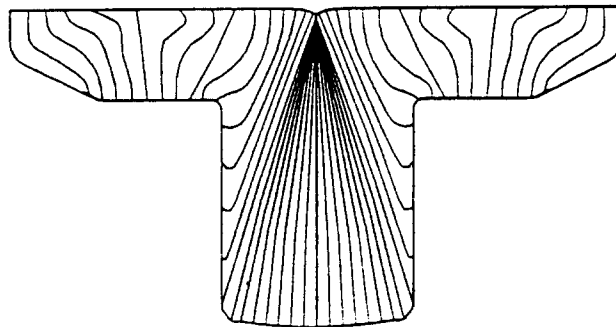


Fig 3. Schematic drawing of cold forged aluminum valve component.



(a)



(b)

Fig 4. (a) Actual and (b) predicted texture formed during aluminum valve forging operation. The defect along the center line as shown in (a) is also predicted.

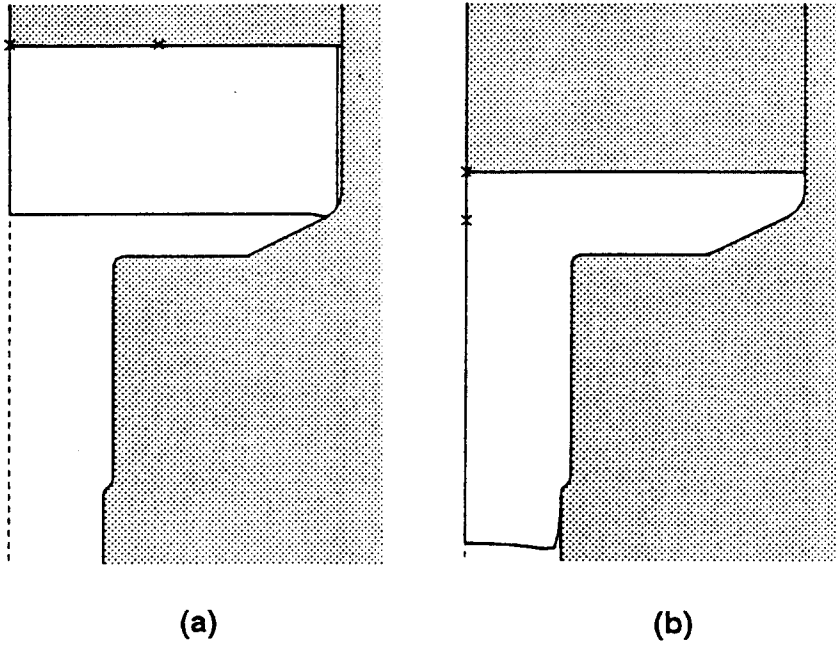


Fig 5. Prediction of free surface movement by point tracking procedure.
 (a) initial and (b) final locations of two selected points.

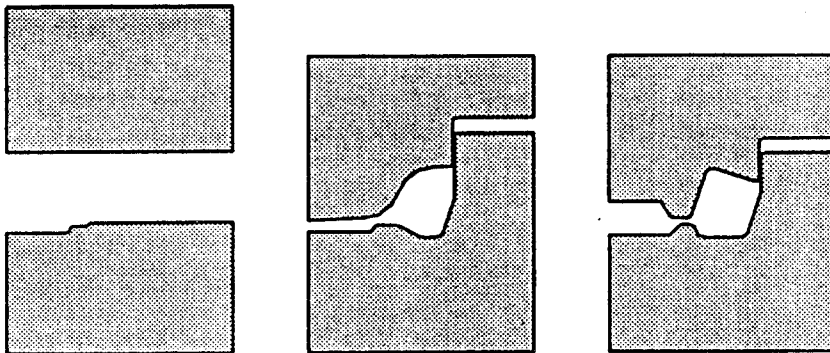


Fig 6. Schematic drawing of busting, and finishing die geometries of ring gear forging operation. Only 1st and 4th quadrants are shown.

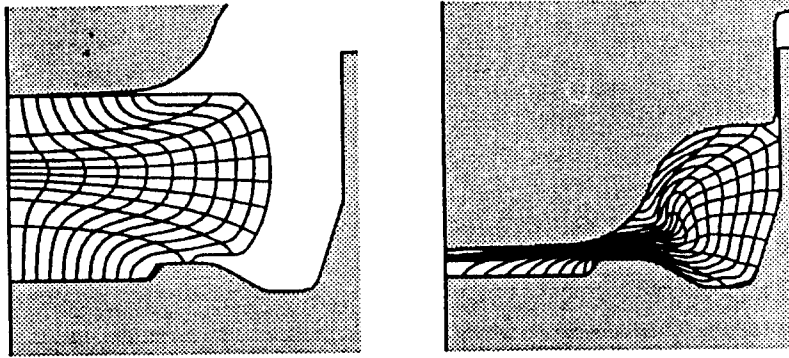


Fig 7. Predicted FLOWNET at the beginning and end of blocking operation.

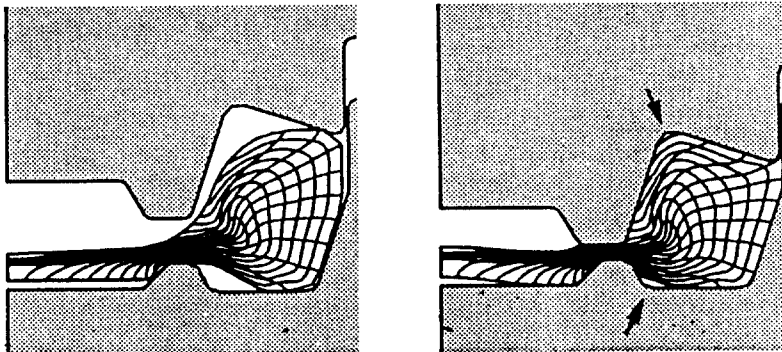


Fig 8. Predicted FLOWNET at the beginning and end of finishing operation. Arrows indicate underfilling.

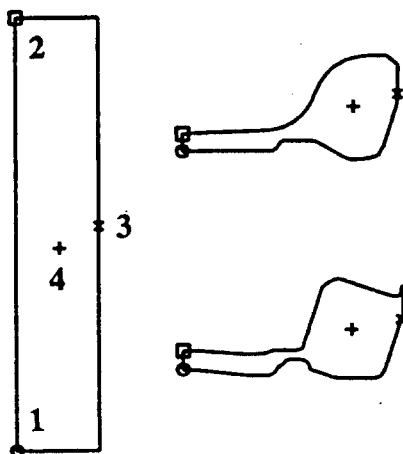


Fig 9. Predicted material point locations by forward (pts. 1, 2, 3) and backward (pt. 4) point tracking technique.

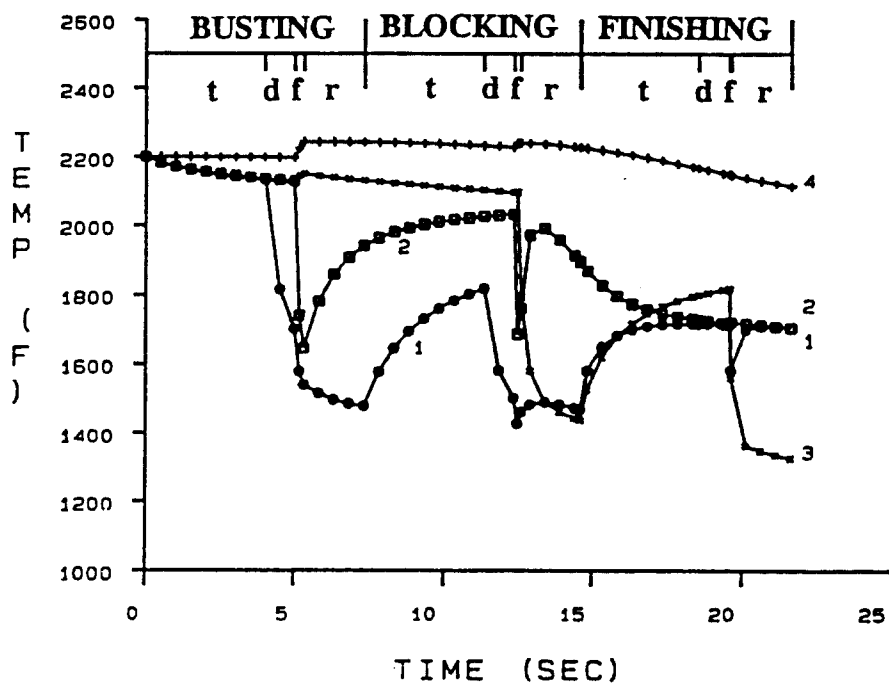


Fig 10. Predicted temperature changes at various stages of ring gear forging operation. Numbers indicate the locations as identified in Fig 10. t : transfer, d : dwelling, f : forming, and r : resting.

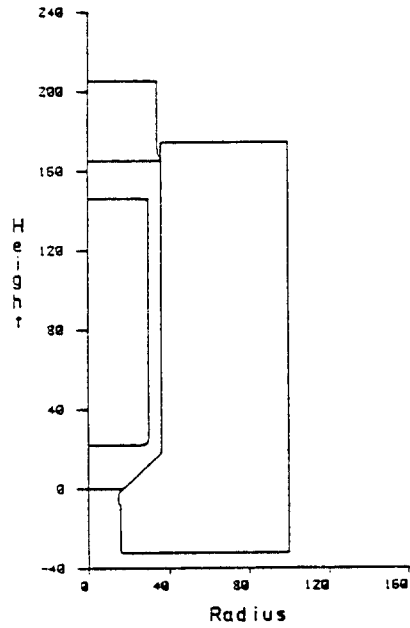


Fig 11. Schematic drawing illustrating canned extrusion process.

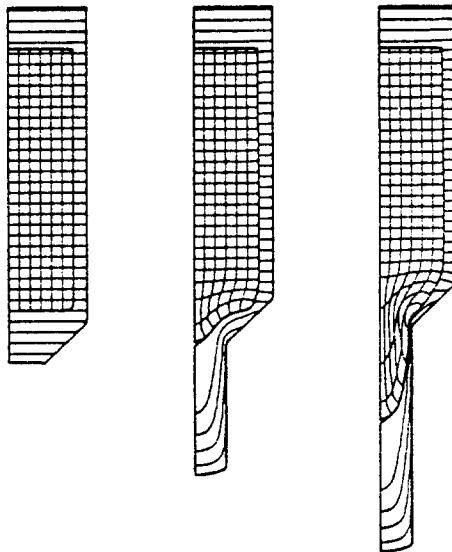


Fig 12. Predicted FLOWNET during canned extrusion of Ti-Al at punch strokes of 0, 10.87 and 18.5 mm.

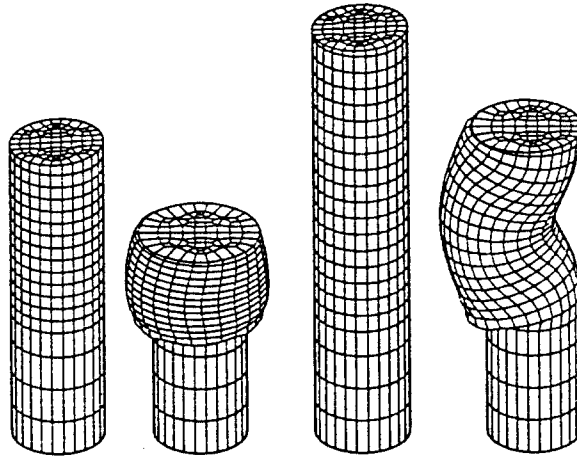


Fig 13. Initial and deformed FEM meshes of the two cases.

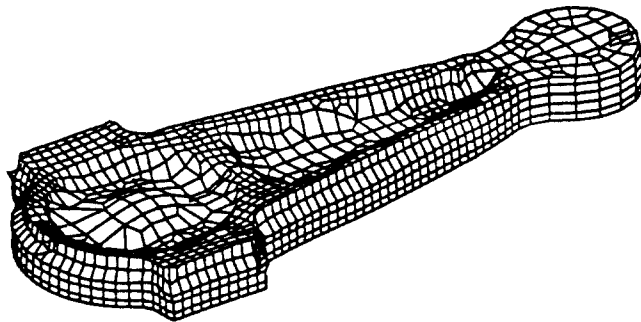


Fig 14. Deformed FEM grids in connecting rod forging simulation.